第 40 卷 第 2 期
2022 年 6 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 40, No. 2
June., 2022

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.02.08

用于 VLBI 测轨的新型 Gold 码调制 PN-DOR 信标的设计与仿真

陈 奥[1,2]，童 力[2,3,4,5]，郑为民[2,3,4,5]

(1. 上海大学 信息与通信工程学院，上海 201900； 2. 中国科学院 上海天文台，上海 200030； 3. 中国科学院 射电天文重点实验室，南京 210023； 4. 国家基础学科公共科学数据中心，北京 100190； 5. 中国科学院 上海市空间导航与定位技术重点实验室，上海 200030)

摘要： 中国 VLBI 网 (Chinese VLBI Network, CVN) 在探月工程中采用相对差分单向测距 (delta differential one-way ranging, ΔDOR) 技术，通过交替观测探测器和邻近致密射电源标校系统误差，以获得高精度的探测器轨道角位置。尽管如此，探测器和射电源信号频谱差异引起的接收设备相位波动仍然是 ΔDOR 的重要误差来源之一。通过 Gold 码对 DOR 信标扩频调制，产生与射电源频谱特性近似的伪随机噪声差分单程测距 (pseudorandom noise DOR, PN-DOR) 信标，可以有效减少相位波动误差。参考中国探月工程嫦娥五号的 VLBI 信标参数，设计了 PN-DOR 信标参数，生成了 PN-DOR 信标，完成了 PN-DOR 信标的编码、调制、提取、解调和解码等过程的仿真分析，由于后续探月任务可能出现频谱混叠情况，还研究了频谱混叠对 PN-DOR 的影响。

关 键 词： VLBI；PN-DOR；ΔDOR；Gold 码

中图分类号： P145.2 **文献标识码：** A

1 引 言

甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 技术是一种重要的干涉测量技术。它将多个距离数百乃至数千千米的射电望远镜，合成为一个巨大的综合孔径望远镜，是目前分辨率最高的天文观测技术，广泛应用于天体物理学、天体测量学、大地测量学和深空探测领域。我国 VLBI 网由天马站、佘山站、密云站、昆明站和南山站五个 VLBI 站和上海 VLBI 数据处理中心组成，参与了我国历次探月任务和首次火星探测任务，并在关键

收稿日期： 2021-10-28； **修回日期：** 2021-11-17

资助项目： 国家自然科学基金 (11973011)；国家基础科学数据共享服务平台 (DKA2017-12-02-09)；中科院关键技术人才；上海市领军人才；上海天文台重点培育项目

通讯作者： 童力，tongli@shao.ac.cn

任务阶段发挥了不可替代的作用[1]。

VLBI 采用 ΔDOR 测量技术，通过交替观测探测器和近邻致密射电源，以修正设备和传播介质等系统误差，得到高精度的时延和时延率观测值。我国在 2012 年嫦娥二号探月任务中首次开展了 X 波段的 ΔDOR 测量试验，以事后方式获得定轨时延精度，发现结果优于 0.5 ns[2]。在后续嫦娥三号定轨时延精度为 0.8 ns，嫦娥四号定轨时延精度达到 0.7 ns[3]。2020 年，我国发射了嫦娥五号探测器和首个火星探测器天问一号，平均定轨时延精度分别达到 0.4 ns 和 0.2 ns[4]。目前美国深空探测的 ΔDOR 测量时延精度可以达到 0.038 ns[5]，我国与美国的 ΔDOR 测量精度依然存在一定差距。

ΔDOR 的测量精度受到诸多因素的影响，图 1 为美国 NASA 深空网 ΔDOR 测量目前达到的时延精度以及误差源分析[6]，图中绿色项为随机性误差，红色项为系统性误差，灰色项为所有误差项平方和的平方根 (root sum square, RSS)。系统性误差包括射电源位置误差、观测台站位置误差、地球自转参数误差等，随机性误差包括由观测源热噪声、钟的不稳定性、接收设备相位波动性等因素引起的时延误差。在所有误差源中，接收设备相位波动导致的时延误差最明显，它对 DOR 时延测量误差的贡献为：

$$\sigma_\tau = \frac{\epsilon_\varphi}{180\Delta f} \quad , \tag{1}$$

式中，ϵ_φ 为相位波动值，Δf 为 DOR 信号的最大间距。

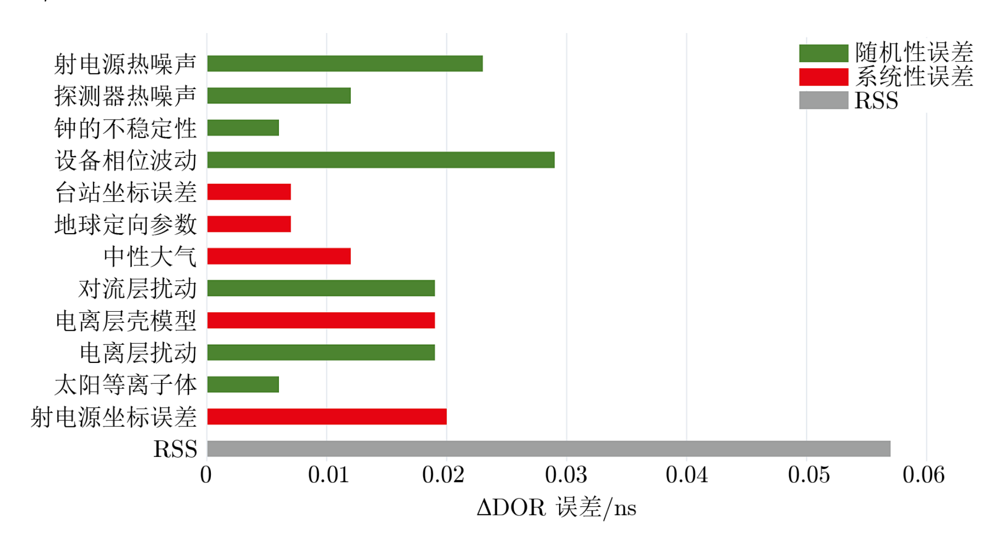


图 1 ΔDOR 误差源分析[6]

相位波动由接收设备的非线性相频响应特性所引起。探测器的 DOR 信标和射电源信号在接收设备相位波动下的相频响应见图 2[6]。射电源信号是广谱信号，其频谱分布于整个记录通道，在通道带宽内受到平均设备相位波动的影响。探测器的 DOR 信标是点频信号，只在接收 DOR 信标频率处受到设备相位波动的影响。两者的频谱差异较大，导致设备接收射电源信号与 DOR 信标引起的相位波动不一致，无法通过差分方式抑制相位波动效应，降低

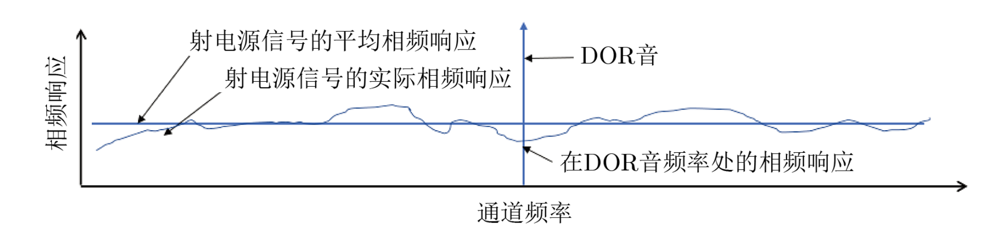


图 2　观测频率通道内 DOR 信标和射电源信号在接收设备相位波动下的相频响应[6]

了 ΔDOR 测量时延精度。

为了减少相位波动的影响，美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 使用伪随机噪声序列来扩频调制传统 DOR 信标，将 DOR 信标扩频为具有一定宽带的信标，这种新型信标称为 PN-DOR 信标。PN-DOR 信标与射电源信号频谱近似，可以通过差分方式有效减少相位波动效应，从而降低接收设备引起的相位波动误差。JPL 利用 MATLAB 的 Simulink 工具仿真调制了 X 波段和 Ka 波段的 PN-DOR 信号，并应用于火星轨道微卫星的 Iris SN104 应答机和通用空间应答器发射机的样机设计[7, 8]。根据 JPL 仿真分析，PN-DOR 信标预计由相位波动效应引起的测量时延误差将减少 80% ~ 90%，总时延误差最高则可以减少 40%[7]。

同时通过选取较长的码周期，PN-DOR 信标能够获得良好解时延模糊度能力，降低对轨道先验信息的要求。传统 ΔDOR 依赖一组低频 DOR 信标解模糊度，例如 X 波段使用 3.8 MHz 的 DOR 信标解模糊度，而 PN-DOR 解模糊度能力取决于码周期，通过合理设计码周期长度可实现远优于传统 DOR 的解模糊度能力，因此只需要一组 PN-DOR 信标足以实现解模糊度和精确时延测量，可节约频带资源[7]。通过选择具有抗干扰性能的 PN 码序列，可以提高 PN-DOR 信标的抗干扰性能，实现在相同频段下同时接收多个 PN-DOR 信标，并能够互不干扰地提取相应 PN 码序列。

PN-DOR 信标由传统 DOR 信标发展而来，对 PN-DOR 信标的数据采集和处理方法与对传统 DOR 信标的处理方法类似，硬件和软件设备基本可以通用。两者主要区别是 PN-DOR 信号需要解码 Gold 码序列信息用于解模糊度。

本文参考我国探月工程嫦娥五号 VLBI 信标参数，选择 Gold 码作为扩频码，设计出一组 PN-DOR 信标参数。参考 VLBI 数据采集流程，开展 PN-DOR 信标的编码、调制、提取、解调和解码等流程的仿真分析。由于后续探月任务可能出现频谱混叠情况，还分析了频谱混叠对 PN-DOR 信标的影响。

2　PN-DOR 信标的参数设计

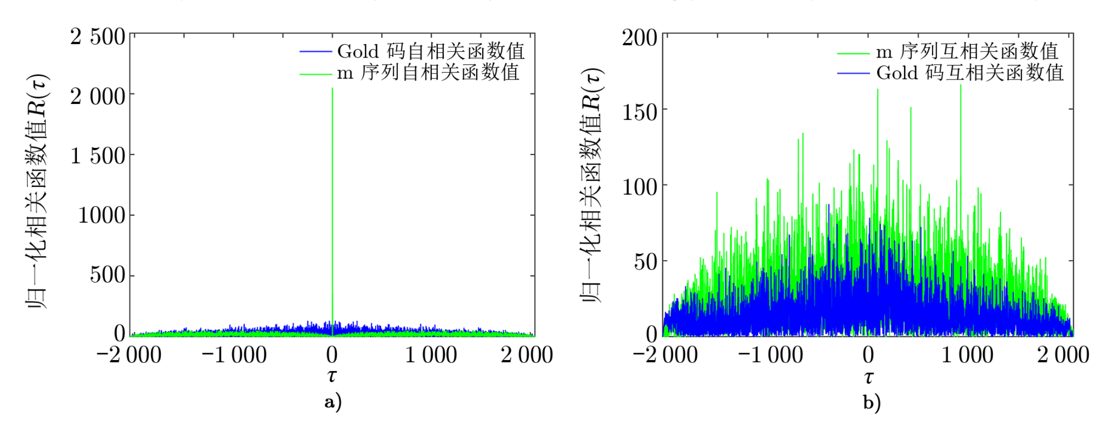
本章介绍了生成 PN-DOR 信标使用的扩频码，以及整形滤波器的参数设计原则和方法，并参考我国探月工程嫦娥五号 VLBI 信标参数，设计出一组 PN-DOR 信标的实现参数。

2.1 Gold 码

为保证 PN-DOR 信标的抗干扰性能，选择伪随机噪声序列作为扩频码，使用的伪随机序列应具有以下特征：(1) 尖锐的自相关特性；(2) 弱互相关特性；(3) 可以产生足够多的序列数量。m 序列和 Gold 码序列就是满足以上性质且应用广泛的两种伪随机噪声序列。

m 序列是由多级移位寄存器通过线性反馈产生的最大长度码序列，n 级移位寄存器产生的 m 序列周期为 2^n-1，具有良好的相关性质。Gold 码序列由两个码长、码时钟速率相同的 m 序列优选对进行逐位模 2 和运算所生成，通过改变两个 m 序列的相对位移可以产生新的 Gold 码序列。两个 m 序列有 2^n-1 种相对位移量，所以可以获得 2^n-1 组 Gold 码序列，加上 2 个基本的 m 序列，总共可以产生 2^n+1 组 Gold 码序列[9]。随着级数 n 的增加，Gold 码序列的数量远超过同级数的 m 序列的数量。例如，当移位寄存器级数 $n=11$ 时，可以产生 126 组 m 序列，但是相同级数下可以产生 2 049 组 Gold 码序列。

同时，Gold 码序列保留了 m 序列良好的相关性。以级数 $n=11$ 为例，图 3 a) 为 Gold 码序列和 m 序列的自相关特性，图 3 b) 为任意 2 个 Gold 码序列和 2 个 m 序列优选对的互相关特性，m 序列和 Gold 码序列的归一化自相关函数最大值都为 1，所以最大值处重合。Gold 码序列和 m 序列都具有尖锐的自相关性和弱互相关性，但 Gold 码序列的互相关值普遍小于 m 序列优选对的互相关值，因此使用 Gold 码更便于从混叠信号中分离出目标信号。



注：a) m 序列和 Gold码 序列的自相关特性；b) m 序列和 Gold 码序列的互相关特性。

图 3 m 序列和 Gold 码序列的自相关和互相关性质比较

2.2 RRC 滤波器

Gold 码序列必须经过脉冲整形后方可调制于统一载波发射，否则会产生旁瓣，导致信号能量分散，发生码间串扰[10]。由于理想的矩形脉冲不能物理实现，所以选择根升余弦 (root raised cosine, RRC) 滤波器对 Gold 码序列整形滤波，把 Gold 码序列频谱带宽调整为目标带宽，再调制发射。

RRC 滤波器的性能由参数滚降因子、跨度系数决定。滚降因子主要影响 RRC 滤波器过渡带的衰减速度：滚降因子越小，则滤波器过渡带衰减越快，且过渡带宽越窄。RRC 滤波器在跨度系数为 16 的条件下，计算出不同滚降因子的幅频响应，如图 4 所示。跨度系数不

仅影响过渡带宽，还影响旁瓣幅值衰减速度。RRC 滤波器在滚降因子取 0.3 的条件下，我们得到不同跨度系数的幅频响应，结果见图 5。结合图 4 与图 5 可知，滚降因子越小，跨度系数越高，RRC 滤波器的通带越平坦，过渡带宽越窄，则旁瓣衰减越快。一般情况下，滚降因子越小，跨度系数越大，RRC 滤波器的整形效果越好，但是会增加实际逻辑系统实现的复杂性，所以需要综合多方面因素考虑 RRC 滤波器参数。

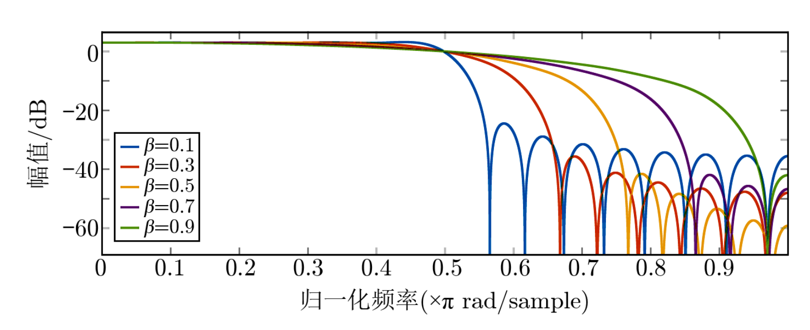


图 4　RRC 滤波器不同滚降因子的幅频响应

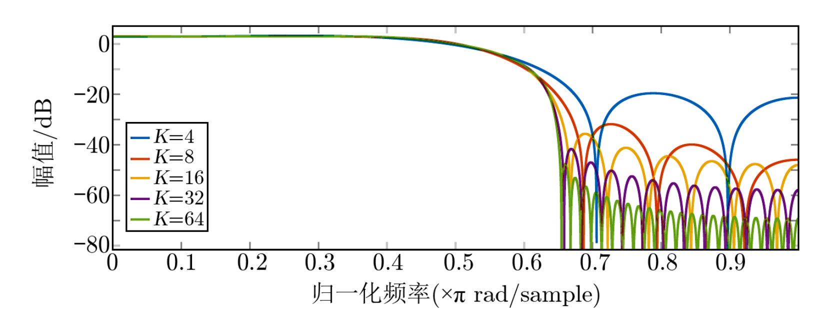


图 5　RRC 滤波器不同跨度系数的幅频响应

2.3　Gold 码和 RRC 滤波器参数设计

在嫦娥五号探月任务中，记录射电源信号的频率通道带宽为 2 MHz，因此设计 PN-DOR 信标的带宽 W 为 2 MHz。为了获得尽可能平坦的通带，且保证信号功率都在观测频率通带内，RRC 滤波器的滚降因子 β 需满足 $\beta \leqslant 0.3$。带宽 W、码速率 R 和滚降因子 β 满足以下关系式：

$$W = R(1+\beta) \quad , \tag{2}$$

其中，W=2 MHz, $\beta \leqslant 0.3$，在仿真实验中取 β=0.25, R=1.6 Mc/s。

根据国际空间数据系统咨询委员会 (Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS) 推荐，为保证 PN-DOR 信标具有足够解时延模糊度的能力，时延模糊度 P 至少需要 1 ms，即 Gold 码周期须大于 1 ms[6]。线性移位寄存器的级数 n，时延模糊度 P 和码速率 R 满足以下关系式：

$$n = \log_2(PR+1) \quad . \tag{3}$$

利用时延模糊度 $P \geqslant 1$ ms, $n \in \mathbb{N}$, R=1.6 Mc/s，解得 $n \geqslant 11$。选择一对 11 阶 m 序列优

选对的本原多项式，$h_1 = x^{11}+x^3+1$, $h_2 = x^{11}+x^9+x^3+1$，生成 Gold 码序列。由于双极性不归零码抗干扰能力较强，不受信道特性变化影响，所以把码元 0/ + 1 变换为 −1/ + 1。

3 PN-DOR 信标的仿真实现

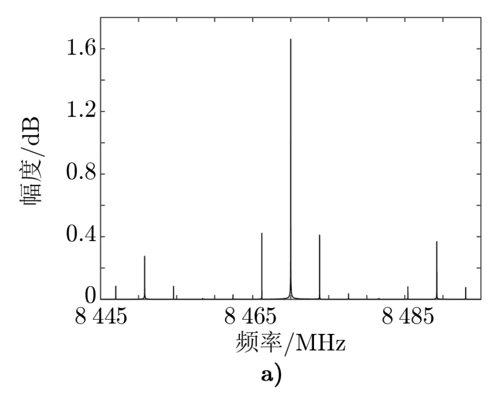
本章在 PN-DOR 信标的仿真参数设计的基础上，仿真调制中频 PN-DOR 信标，比较 PN-DOR 信标与 DOR 信标的频谱差异，并参考 VLBI 数据采集流程，设计观测频率通道，从中频仿真信号提取基频 PN-DOR 信标，对基频 PN-DOR 信标解调和解码。

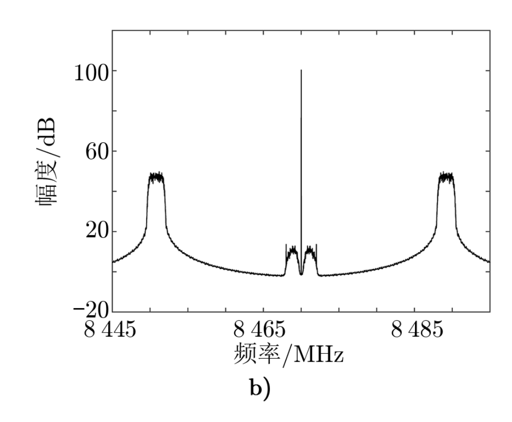
3.1 PN-DOR 的调制

根据 CCSDS 标准，探测器下行信号采用统一载波测控系统，则 ΔDOR 的两组 DOR 信标通过相位调制在下行信号的统一载波上，其表示为：

$$s(t) = \sqrt{2P_{\mathrm{T}}}\sin[2\pi f_{\mathrm{c}}t + \phi_1\sin(2\pi f_1 t) + \phi_2\sin(2\pi f_2 t)] \quad , \tag{4}$$

式中，P_{T} 为下行信号的总功率，f_{c} 为主载波频率，ϕ_1 和 ϕ_2 为调制指数，f_1 和 f_2 为 DOR 信标的频率。在 X 波段两组 DOR 信标频率分别为 f_1=3.8 MHz 和 f_2=19.2 MHz。参考探月工程嫦娥五号的信标参数，设计 X 波段主载波 f_{c}=8 470 MHz，调制指数 ϕ_1=ϕ_2=0.4 rad，图 6 a) 为 DOR 信标的频谱。





注：a) DOR 信标的频谱；b) PN-DOR 信标的频谱。

图 6 DOR 信标与 PN-DOR 信标频谱对比

由于一组 PN-DOR 信标足够解算时延模糊度，且频率间隔越宽，时延测量精度越高，因此只需对载频 f =19.2 MHz 的 DOR 侧音扩频调制。调制 PN-DOR 信标的下行信号为：

$$s(t) = \sqrt{2P_{\mathrm{T}}}\sin[2\pi f_{\mathrm{c}}t + \phi a(t)\sin(2\pi f t)] \quad , \tag{5}$$

式中，$a(t)$ 为 Gold 码序列，ϕ 为调制指数，ϕ 取 0.4 rad。

为了降低计算规模，在不影响原信号结构的前提下，从数字中频开始仿真，起始频率

f_d =8 445 MHz，调制 PN-DOR 信标的下行信号可表示为：

$$s(t) = \sqrt{2P_T}\sin[2\pi(f_c - f_d)t + \phi a(t)\sin(2\pi f t)] \quad . \tag{6}$$

利用第 2.3 节设计的 PN-DOR 仿真参数，随机选择一组 Gold 码序列并通过滚降因子 β=0.25，跨度系数 K=32 的 RRC 整形滤波器进行整形滤波，然后把整形后的 Gold 码序列扩频调制到 f=19.2 MHz 的 DOR 测音上，最终得到调制 PN-DOR 信标的下行信号，如图 6 b) 所示。在载频 f=19.2 MHz 处得到了平坦带宽的 PN-DOR 信标，传统 DOR 点频信号扩展为 2 MHz 左右的带宽信号。

3.2　PN-DOR 的提取

参考 VLBI 数据采集流程，从中频仿真信号中提取包含 PN-DOR 信标的基频信号，用于后续对 PN-DOR 信标解调和解码，其流程如图 7 所示。

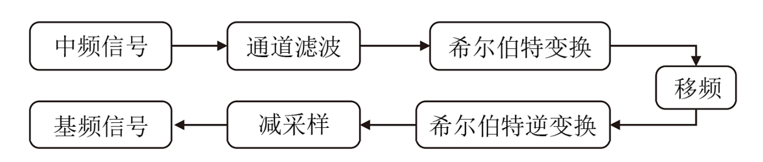


图 7　从中频提取包含 PN-DOR 信标的基频信号的流程图

根据 PN-DOR 信标的幅频特性，设置观测频率通道为 2 MHz，对中频信号进行通道滤波，提取相应频率范围内的信号。经过通道滤波后的信号为实信号，在正负频域存在对称的频率分量，直接移频会引起正负频域的信号混叠。为避免发生这种情况，先对其做希尔伯特变换，只保留正频域分量，移频后再做希尔伯特逆变换，恢复为实信号。最后通过减采样降至基频，得到包含 PN-DOR 信标的基频信号。

图 8 是包含 PN-DOR 信标的基频信号幅频图。在观测频率通道内，PN-DOR 信标的频谱与射电源频谱近似，因此可以通过差分的方式降低设备相位波动效应带来的时延误差。

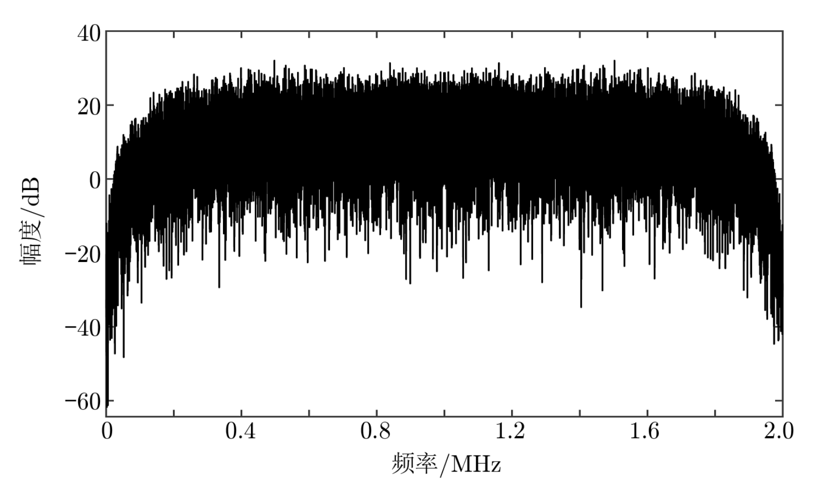


图 8　包含 PN-DOR 信标的基频信号幅频图

3.3 PN-DOR 的解调和解码

不同于常规 VLBI 在接收到包含 DOR 信标的基频信号后直接做干涉处理，接收到包含 PN-DOR 信标的基频信号不仅需要做相关处理，还需要做解调和解码以获取 Gold 码序列用于解模糊度等后处理，再通过后处理得到时延和时延率。

PN-DOR 信标的解调过程包括相干解调、低通滤波和抽样判决三个部分。相干解调时本地必须提供一个与接收的调制信号同频同相的相干载波。由于在从中频信号提取 PN-DOR 信标并在转换至基频的过程中使用了线性相位滤波器，信号相位发生了变化，需要进行相位补偿，补偿的相位 $\psi_{\rm fir}$ 为：

$$\psi_{\rm fir} = \pi f_{\rm b}(N-1)\Delta T \quad , \tag{7}$$

式中，N 为线性滤波器的阶数，ΔT 为采样时间间隔，即中频信号采样率的倒数，$f_{\rm b}$ 为基频的载波频率。由于观测频率通道为 2 MHz，所以 $f_{\rm b}$=1 MHz，相干载波为：

$$c(t) = \sin(2\pi f_{\rm b}t - \psi_{\rm fir}) \quad . \tag{8}$$

将相干载波与接收的已调信号进行相乘运算，再经过低通滤波器取出低频分量，然后设置判决门限为 0，进行抽样判决并实现解调。由于传输过程中存在噪声干扰，直接解码存在一定误码率，因此接收端须产生一个与接收的码元序列相位相同的扩频码进行相关计算，以实现解码。

本次实验采用滑动相关法，解码流程如图 9 所示，接收端设置与发射端相同的 Gold 码序列发生器，选择任意一组 m 序列向后循环移位 i 位 (其中 i=1, 2, 3, ···, 2 047)，与另一组 m 序列进行模 2 和运算，产生第 i 组 Gold 码序列，令其与接收的码元序列进行相关计算。当本地 Gold 码序列与接收序列相位相同时，会出现相关系数峰值，此时可判定发送序列为与之最相关的本地 Gold 码序列，从而实现解码。

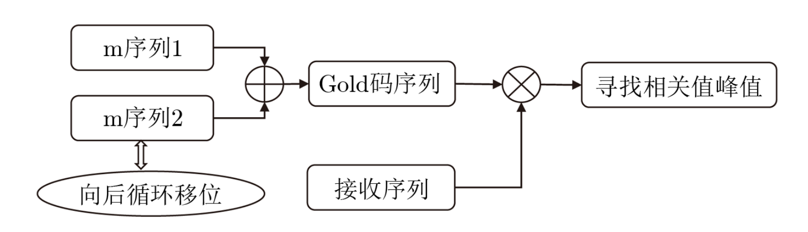


图 9 Gold 码的解码流程图

图 10 为 PN-DOR 的解码结果，横坐标为本地第 i 组 Gold 码序列，纵坐标为本地 Gold 码序列与接收序列的相关系数。滑动相关解码时出现唯一相关峰值，则可以判定发送序列为产生相关峰值的本地 Gold 序列。

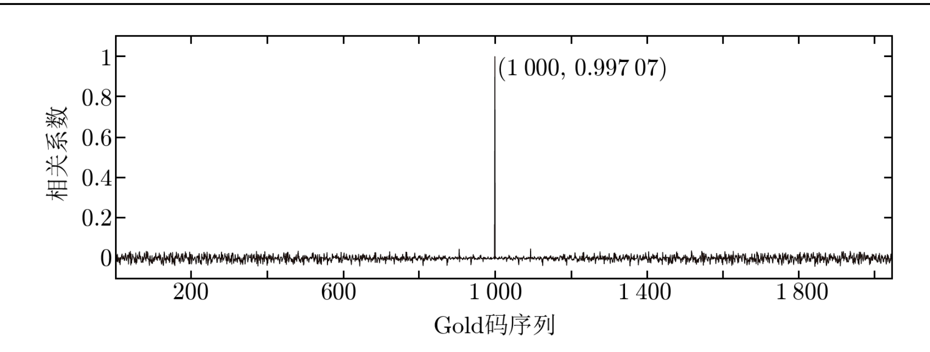


图 10　Gold 码的解码结果

4　频谱混叠对 PN-DOR 的影响

在 PN-DOR 信标的编码、调制、提取、解调和解码等过程仿真分析的基础上，针对未来深空探测任务中可能出现的频谱混叠现象进一步展开研究。仿真两个 PN-DOR 信标发生不同程度的频谱混叠场景下，目标 PN-DOR 信标的提取、解调和解码过程，分析频谱混叠对 PN-DOR 的影响。

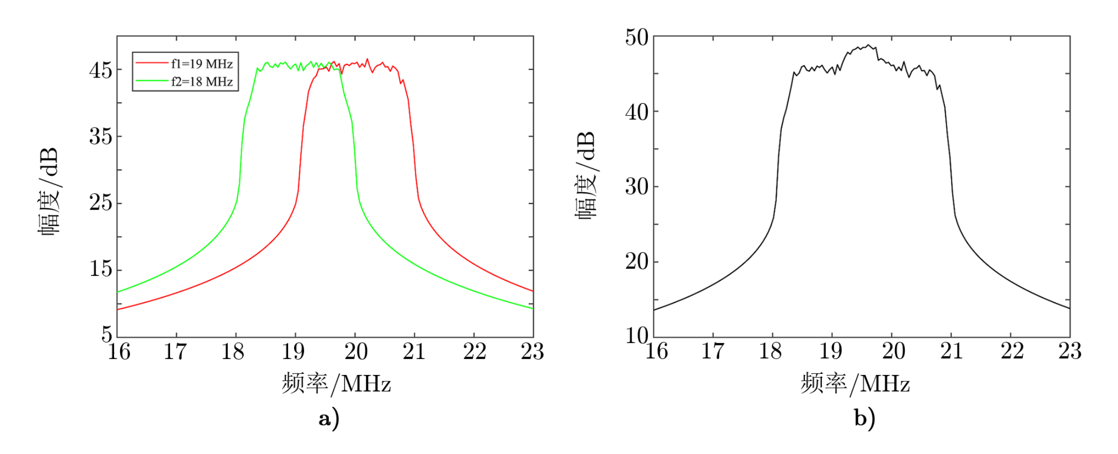
4.1　频谱混叠现象原理分析

根据国际电信联盟分配给深空探测使用的频率范围，X 波段频率范围为 8 400 ～ 8 500 MHz[1]，测控下行信号的信道资源有限。随着深空探测任务的深入和探测器数量增多，不同探测器信标间不可避免会发生互相干扰现象。通常在实际工程任务中会合理设置多个 PN-DOR 载波，避免频谱混叠引起的干扰问题，同时，每个探测器信号都有独立的相位中心，相关处理根据不同的相位中心分别处理 PN-DOR 信号数据，因此在频谱有干扰的情况下通常也能获得干涉条纹。在频谱混叠情况下，能正确解出 Gold 码用于解模糊度为 PN-DOR 信标用于 VLBI 测轨提供了有力的支撑。

PN-DOR 信标是具有一定频谱带宽的信号。若 X 波段的 PN-DOR 信标带宽为 2 MHz，在接收天线的同一波束内，接收到两个 PN-DOR 信标的中心频率为 f_1 和 f_2，若 $|f_1 - f_2| < 2$ MHz，则两个 PN-DOR 信标发生频谱混叠，产生相互干扰。

随机选择 2 组 Gold 码序列，经过 RRC 滤波器整形滤波后分别与频率 f_1=19 MHz 和 f_2=18 MHz 的 DOR 信标扩频调制，两个 PN-DOR 信标之间发生 1 MHz 的频谱混叠，混叠率为 50%。仿真结果见图 11，图 11 a) 展示了两个 PN-DOR 信标发生了频谱混叠，图 11 b) 展示了混叠后的频谱，整体频谱带宽变宽，结果为 3 MHz 左右。

假设观测目标是探测器载频为 19 MHz 的 PN-DOR 信标，观测频率通道带宽为 2 MHz。按照图 7 的提取基频信号流程，根据观测目标设计观测频率通道，对中频信号进行通带滤波、希尔伯特变换、移频、希尔伯特逆变换和减采样等处理，最后提取出的基频信号的幅频图如图 12 所示。与图 8 进行对比后可知，提取出的基频信号的频谱左侧混叠了其他信标，受到了干扰。



注：a) 频谱混叠前；b) 频谱混叠后。

图 11　两个 PN-DOR 信标频谱混叠

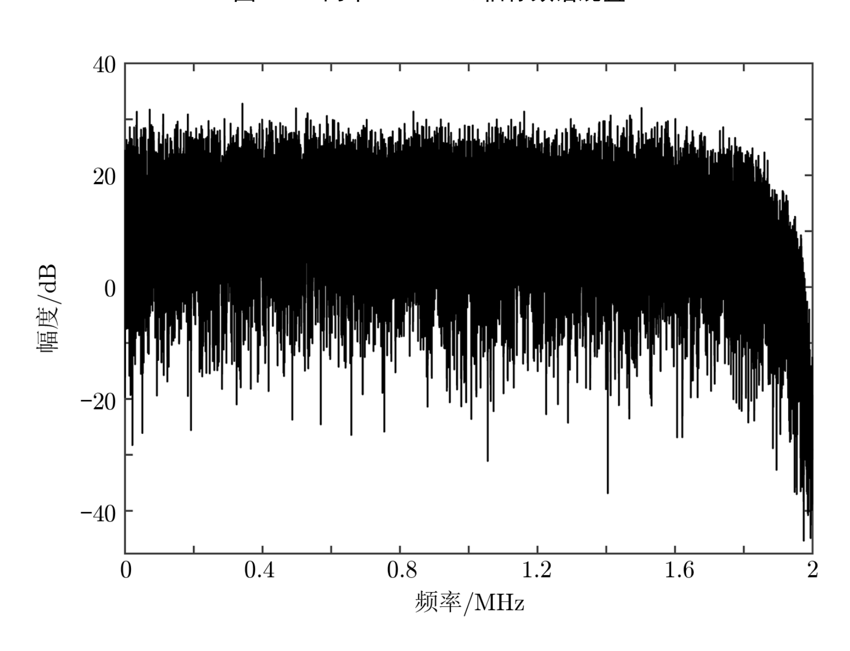


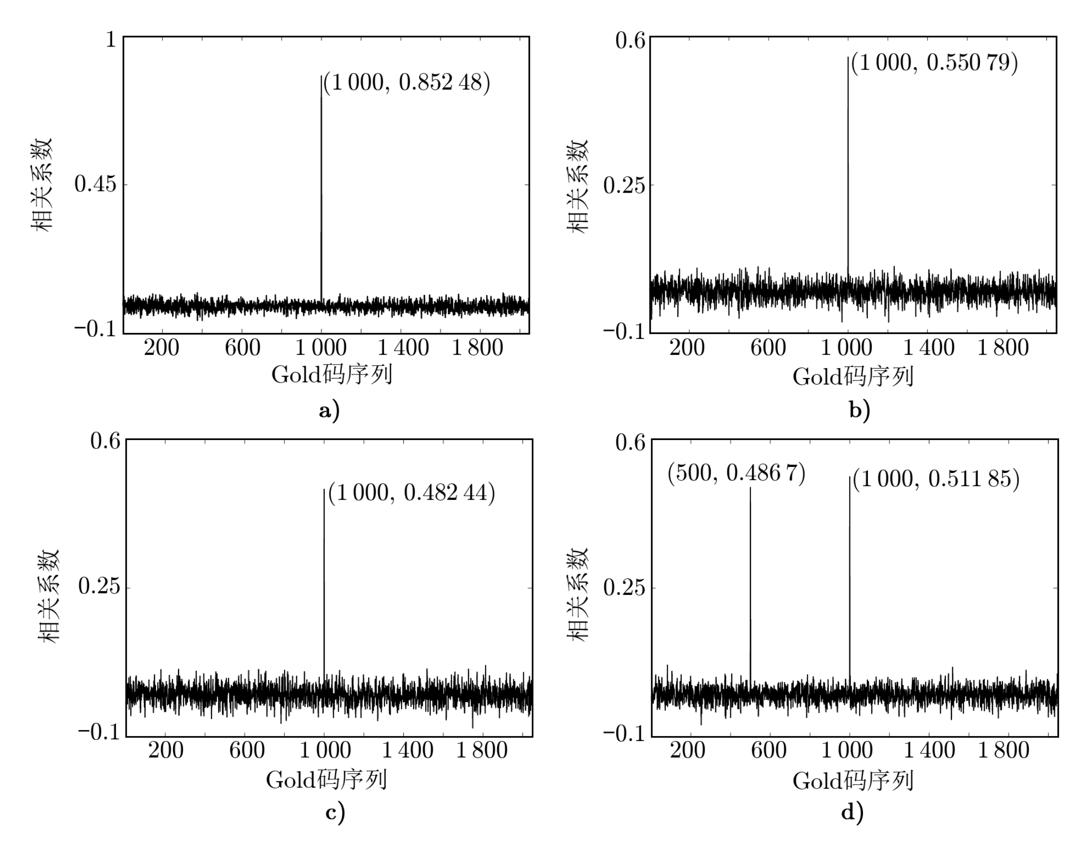
图 12　频谱混叠场景下提取基频信号的幅频图

4.2　频谱混叠对 PN-DOR 影响试验

频谱混叠场景下的 PN-DOR 信标和单个的 PN-DOR 信标的解调与解码过程完全一致。本地生成一个与接收调制信号严格同步的相干载波，进行相干解调。由于目标观测的 PN-DOR 信标发生频谱混叠，会受到强烈干扰，而接收端的 Gold 码序列发生器通过循环移位产生一个与接收的码元序列相位相同的扩频码，两者进行相关计算时会产生相关系数峰值，把受到干扰的信息序列恢复成完整无差错的 Gold 码序列。

通过调整两个 PN-DOR 信标的载波相对距离，可以改变频谱混叠程度。图 13 展示了

不同频谱混叠程度下 PN-DOR 的解码结果。由图 13 a), b) 和 c) 可知，尽管频谱混叠程度不断加剧，但是接收序列与本地 Gold 码序列进行相关计算，始终出现相关峰值，均可正确解码。



注：a) 混叠率为 25%；b) 混叠率为 50%；c) 混叠率为 75%；d) 混叠率为 100%。

图 13　不同频谱混叠率下的 Gold 解码结果

当两个 PN-DOR 信标的频谱完全重叠时，依然可以分别正确解码。如图 13 d) 所示，接收序列与本地 2 组 Gold 码序列的相关系数都接近 0.5，且远远高于其他序列的相关系数，那么可以判定这两个信标发送的信息序列为产生相关峰值的本地 Gold 码序列。因此，在频谱混叠的情况下，PN-DOR 信标仍然可以正确解出 Gold 码序列。

5 总　结

本文研究了一种基于 Gold 码序列对 DOR 信标进行扩频调制的新型信标——PN-DOR，用一定带宽的连续谱信号代替传统点频信号，其谱近似于射电源信号频谱，可以减少由于设备相位波动效应引起的测量时延误差，大幅度提高深空探测器 VLBI 的群时延测量精度。

本文参考嫦娥五号 VLBI 信标参数，介绍了 PN-DOR 信标的参数设计要求和方法，以射电源观测带宽为 2 MHz 为例，设计了一组 PN-DOR 信标仿真参数，开展了 PN-DOR 信标的编码和调制仿真，对比分析 DOR 与 PN-DOR 信标的频谱差异；参考 VLBI 数据采集流程，从中频仿真信号中提取包含 PN-DOR 信标的基频信号，然后对基频 PN-DOR 信号进行解调和解码，以方便后续解模糊度等处理过程；模拟了两个 PN-DOR 信标频谱混叠场景，分析了频谱混叠对 PN-DOR 信标的影响。这些工作为后续 PN-DOR 信标的应用奠定了基础。

参考文献：

[1] 钱志翰, 李金玲. 甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用, 北京: 中国科学技术出版社, 2012: 11
[2] 吴伟仁, 王广利, 节德刚, 等. 中国科学: 信息科学, 2013, 43(02): 185
[3] 黄勇, 李培佳, 胡小工. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(04): 340
[4] 李培佳, 黄勇, 樊敏, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2021, 51(11): 9508
[5] James S B. Delta Differential One-way Ranging，California: California Institute of Technology, 2021: 20
[6] CCSDS. https://public.ccsds.org/Pubs/500x1g2.pdf, 2019
[7] Zaid J T, Christopher P V, James S, et al. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2020, 35(3): 70
[8] Zaid J T, Thaddaeus J V, Mazen M S, et al. https://ieeexplore.ieee.org/document/8741682, 2019
[9] 吴海红. 喀什师范学院学报, 2010, 31(3): 39
[10] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理 (第 7 版). 北京: 国防工业出版社, 2013: 1

Design and Simulation of a New PN-DOR Beacon Modulated by Gold Code Used in the VLBI

CHEN Ao[1,2], TONG Li[2,3,4,5], ZHENG Wei-Min[2,3,4,5]

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 201900, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China; 4. National Basic Public Science Data Center, Beijing 100190, China; 5. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: Delta differential one-way ranging (ΔDOR) technology is used in the Chinese Very Long Baseline Interferometry (CVN) system in the Lunar Exploration Smission, which can accurately determine angular position of spacecraft by observing the spacecraft radio signal and nearby quasar radio signals alternately. One of the major error sources is the instrumental phase error, caused by the differences between the spacecraft and quasar signal spectrum. It is possible to reduce phase error by spreading DOR beacons with Gold code,

which are Pseudorandom Noise DOR (PN-DOR) beacons closely resembling the quasar signal spectrum. In this paper we introduce parameter designs of PN-DOR beacons by referring the parameters of VLBI in the Chinese Chang'E-5 lunar mission , realize PN-DOR beacons, and also finish coding, modulation, extraction, demodulation and decoding of PN-DOR beacons. Finally, the influence of PN-DOR beacons due to spectral aliasing is analysed, because spectral aliasing may occur in the Lunar Exploration mission in the future.

Key words: VLBI; PN-DOR; ΔDOR; Gold code

. . . .